

**Е. А. Буденкова, Я. А. Масютин**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБНОСТИ КОНСОРЦИУМОВ  
ДРОЖЖЕВЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ  
К ПРОДУЦИРОВАНИЮ ЭТАНОЛА**

54

Производство биоэтанола из непищевого сырья считается перспективной альтернативой традиционному получению этанола из пищевых культур. Однако ряд существенных технологических недостатков не позволяет в настоящее время производить биоэтанол в промышленных масштабах. В частности, существует проблема подбора наиболее эффективных микроорганизмов-продуцентов. В силу того что субстрат для спиртового брожения, как правило, является многокомпонентным, более эффективным считается использование не одного, а нескольких штаммов микроорганизмов. В связи с этим целью исследования стал подбор консорциумов дрожжевых микроорганизмов, способных к совместному культивированию, и анализ их способности к синтезу этанола. В соответствии с целью исследования был проведен анализ биосовместимости некоторых дрожжевых микроорганизмов из фонда Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов, способных к продуцированию этанола. Исследована способность к продуцированию этанола дрожжевыми консорциумами с использованием ферментативного гидролизата делигнифицированной целлюлозы мискантуса. Проведено сравнение способности дрожжевых консорциумов к образованию этанола в зависимости от условий аэрации. Контроль динамики редуцирующих веществ в исследуемых пробах осуществлялся с помощью спектрофотометрии, а конечное содержание этанола проанализировано газохроматографически. В результате проведенной работы установлено, что использование консорциума дрожжевых микроорганизмов позволяет эффективно проводить спиртовое брожение, о чем свидетельствует высокая степень биоконверсии редуцирующих веществ.

*The production of bioethanol from non-food feedstock is considered to be a promising alternative to conventional ethanol production from food crops. However, a number of significant technological drawbacks does not allow the industrial production of bioethanol. The most effective microorganisms-producers are hard to identify. Due to multicomponent composition of substrate, the use of several strains of microorganisms is considered to be more effective than that of one strain. Thus, the aim of the study is to select yeast consortia capable of cocultivation, and to analyze their ability to produce ethanol. The study analyzed the biocompatibility of some ethanologenic microorganisms from the All-Russian collection of industrial microorganisms as well as the ability of yeast consortia to generate ethanol through using the enzymatic hydrolyzate of delignified Miscanthus cellulose. Its generating capacity was checked depending on aeration conditions. The test samples were controlled for reducing sugars with spectrophotometry, while the resulting etha-*



*nol content was determined with gas chromatography. It has been found that the use of yeast consortia makes ethanol fermentation efficient, as evidenced by the significant bioconversion of reducing sugars.*

**Ключевые слова:** микроорганизмы, дрожжи, консорциум, мискантус, ферментативный гидролиз, спиртовое брожение, биоэтанол.

**Keywords:** microorganisms, yeast, consortium, Miscanthus plant, enzymatic hydrolysis, ethanol fermentation, bioethanol.

Разработка эффективных способов производства биотоплива из лигноцеллюлозного сырья приобретает все большую значимость в свете истощения запасов ископаемого топлива и ухудшения состояния окружающей среды в результате его добычи. Обладая эколого-экономическими преимуществами, биоэтанол способен составить конкуренцию на мировом топливном рынке [9]. Для того чтобы обеспечить экономически выгодный процесс производства биоэтанола, необходимо добиться эффективного расщепления полимерного лигноцеллюлозного сырья на мономерные сахара, которые в дальнейшем подвергаются сбраживанию микроорганизмами (дрожжами или бактериями) с образованием спирта. Состав и концентрация сахаров в лигноцеллюлозном гидролизате варьируют в зависимости от состава сырья и способа его обработки. К другим важным факторам спиртового брожения относятся отбор и подготовка субстрата, отбор и адаптация микроорганизмов, условия проведения процесса [9].

В связи с назревающим продовольственным кризисом представляется весьма перспективным производство биоэтанола второго поколения, то есть с использованием непищевой растительной биомассы. Травянистое растение мискантус китайский (*Miscanthus sinensis*) позволяет получать десятки тонн урожая с одного посева на протяжении многих лет. Биомасса мискантуса недорога, обильно произрастает и хорошо адаптируется к российским почвам. Основная причина, препятствующая использованию подобного растительного сырья, заключается в недостаточной эффективности методики получения биоэтанола, что обусловлено деградацией сахаров и отсутствием достаточно эффективных микроорганизмов [1]. В связи с этим в качестве исследуемого субстрата был выбран мискантус.

Использование дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* позволило значительно сократить время производство биоэтанола. При этом отмечено, что штаммы, выделенные из натурального субстрата, приводят к значительно большему выходу спирта, чем штаммы чистой линии [9]. Активность дрожжей рода *Saccharomyces* в процессе сбраживания проявляется от начала процесса и до тех пор, пока сбраживаемые сахара полностью не метаболизируются в этанол [6]. Виды дрожжей, не относящиеся к *Saccharomyces*, долгое время не рассматривались на промышленном уровне из-за низкой способности метаболизировать глюкозу в этанол [6], однако они способны к переработке в этанол других углеводов, помимо глюкозы. Эта способность варьирует по причине высокой измен-



чивости штаммов и в зависимости от условий культивирования. В силу низкой (*Candida*, *Pichia*) или умеренной устойчивости к этанолу (*Lachancea*, *Torulaspota*) активность не относящихся к *Saccharomyces* видов угнетается при накоплении в среде этилового спирта в объеме 4% [6]. Лишь немногие виды (*Starmerella stellata*, *Saccharomycodes ludwigii*) проявляют устойчивость к этанолу при температуре ниже 30°C, и их ферментативная активность наблюдается до уровня накопления этанола в 42% [6; 9; 11]. *Zygosaccharomyces rouxii* может расти в условиях экстремально высокой осмоляльности за счет сахаров, но не способен потреблять глюкозу [9].

Сокультивирование разных штаммов дрожжей представляется перспективным за счет более полной переработки многокомпонентного субстрата и большего выхода этанола [5; 13], однако сложность этой методики заключается в обеспечении оптимальных условий сбраживания для двух или более штаммов. Конечное содержание этанола при сокультивировании *Saccharomyces* и прочих дрожжей может снизиться примерно на 1–2%, а процесс брожения может быть увеличен на несколько дней [6]. Возможно, это происходит за счет выработки большого количества нецелевых соединений (молочной и уксусной кислоты, сложных эфиров, глицерина), что замедляет процесс спиртового брожения [6]. Иммуобилизация дрожжевых клеток в биопленке (альгинатные шарики) отчасти позволяет оптимизировать процесс сокультивирования за счет создания локальных ниш, в которых поддерживаются условия, необходимые для разных микроорганизмов. Тем не менее конкуренция за субстрат и различие в оптимальных условиях роста остаются ограничивающими факторами при сокультивировании [14].

Дрожжи, не относящиеся к *Saccharomyces*, чрезвычайно разнообразны, их применение основано на уникальных индивидуальных характеристиках. Наиболее изученными и коммерциализированными видами, не относящимися к *Saccharomyces*, в виноделии являются *Torulaspota delbrueckii* и *Lachancea thermotolerans* [6]. Дрожжи *Scheffersomyces conditionitis* и *Pachysolen tannophilus* обладают высоким потенциалом к сбраживанию пентоз [7; 10; 12; 16]. *Kluyveromyces marxianus* отличается высокой скоростью роста, термостойкостью, способностью усваивать широкий спектр сахаров и производить различные соединения. Несмотря на менее эффективное сбраживание глюкозы по сравнению с *Saccharomyces cerevisiae*, *K. marxianus* способен ускорять производство этанола [4]. Термостойкость *K. marxianus* позволяет проводить спиртовое брожение при высоких температурах, что снижает вероятность микробной контаминации и делает возможным объединение процесса брожения с предшествующей стадией ферментативного гидролиза целлюлозосодержащего сырья [15]. *Starmerella bacillaris* улучшает жизнеспособность клеток дрожжей сахарамидетов и, соответственно, благотворно влияет на процесс брожения. В настоящее время ведутся разработки методики, позволяющей использовать *Starmerella bacillaris* в качестве основного продуцента этанола [8].



В представленной работе проведено исследование способности некоторых дрожжевых микроорганизмов (*K. marxianus*, *S. stipites*, *P. tannophilus*, *S. cerevisiae* М, *S. ludwigii* 8, *Z. rouxii*, *S. bacillaris*, *L. thermotolerans*, *T. delbrueckii*) к сбраживанию глюкозы, полученной из целлюлозы мискантуса, в консорциумах.

### Материалы и методы

**Субстрат.** В качестве субстрата использована делигнифицированная целлюлоза травянистого растения *Miscanthus sinensis* Zebrinus (содержание  $\alpha$ -целлюлозы – 81 %, содержание лигнина – менее 0,2 %). Проведен ферментативный гидролиз субстрата в концентрации 0,1 г/мл и концентрации ферментного препарата 30 мг/мл в натрий-ацетатном буфере (рН 5,0). Условия гидролиза: 100 об/мин, 150 ч, 50 °С. Ферментный препарат «Целлюлак ультра» с активностью 2500 ед/г, созданный на основе микроскопического гриба *Trichoderma reesei*, содержит целлюлазу, бета-глюканазы, пектиназы и экзо-целлобиогидролазы. Активность ферментов прекращали автоклавированием (121 °С, 15 мин). Выход редуцирующих веществ (глюкоза) от массового содержания гидролизуемых компонентов составил 14,13±5,52 мг/мл.

**Микроорганизмы.** Получены из фонда Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов ГосНИИгенетика: *K. marxianus* (Y-2039), *S. stipites* (Y-3264), *P. tannophilus* (Y-3269), *S. cerevisiae* М (Y-4242), *S. ludwigii* 8 (Y-2012), *Z. rouxii* (Y-4659), *S. bacillaris* (Y-4015), *L. thermotolerans* (Y-4532), *T. delbrueckii* (Y-1539). Микроорганизмы инкубировали при 27 °С стационарно на чашках Петри с полной дрожжевой средой (г/л): глюкоза 20, дрожжевой экстракт – 5, пептон – 10, агар – 10. Солевой раствор (г/л):  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 3,75;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 2,1;  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  – 0,5;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0,375. Питательную среду и раствор солей автоклавировали отдельно (121 °С, 15 мин).

**Тест на биосовместимость.** Определение биосовместимости штаммов дрожжей проводилось методом прямого совместного культивирования на плотной питательной среде, предложенным Н. А. Глушановой. Культура, выращенная на жидкой питательной среде в концентрации 0,10–0,11 OD (спектрофотометр Bio-Rad SmartSpec Plus, режим OD600), бактериологической петлей диаметром 3 мм наносится на плотную питательную среду. После впитывания капли на поверхность той же среды наносится капля другой испытуемой культуры, которая при растекании покрывает половину первой капли. Чашки Петри инкубировались в течение 24 ч при температуре 27 °С. Результаты интерпретировались следующим образом: задержка роста одного штамма – антагонизм; выход одной культуры наверх – слабый антагонизм; слияние, усиление роста штаммов – биосовместимые.

**Подготовка к сбраживанию.** Для приготовления инокулята использовали клетки второго пассажа. По достижении клетками дрожжей стационарной фазы (24-часовая инкубация) клетки собирали, центри-



фугировали (4 °С, 7000 об/мин, 5 мин). Супернатант удаляли, осадок промывали стерилизованной деионизированной водой и снова центрифугировали. Солевой раствор добавляли к осадку до достижения подходящей концентрации (OD 0,60–0,61) и инокулировали в гидролизат (5 % от общего объема). При сокультивировании доля инокулята для каждого штамма уменьшена вдвое, чтобы выдержать общий размер инокулята. Условия брожения: 100 об/мин, 144 ч, 30 °С, ограниченная аэрация. Активность ферментов прекращали автоклавированием (121 °С, 15 мин). Сбраживание проводилось в трех повторностях для каждого консорциума.

**Анализ.** Эффективность ферментации контролировали путем периодического отбора (образцы объемом 200 мкл центрифугировали при 7000 об/мин, 10 мин). Концентрацию редуцирующих веществ (глюкозы) определяли через измерение оптической плотности с использованием спектрофотометра UV-3600 Shimadzu (при 664 нм) и медно-щелочного реагента [2]. Скорость сбраживания глюкозы определялась как отношение десятичного логарифма от соотношения начальной и текущей концентрации глюкозы ко времени сбраживания, с учетом поправочного коэффициента.

Содержание этанола в пробе анализировали с помощью газового хроматографа с пламенно-ионизационным детектором (Agilent 7890B), газ-носитель – гелий, деление потока 100:1, объем вводимой пробы 1 мкл, итоговое время хроматографирования 10 мин. Перед анализом к пробам супернатанта добавляли 2 мл диэтилового эфира, помещали на орбитальный шейкер для перемешивания на 30 мин, затем образцы центрифугировали (3900 об/мин, 10 мин), супернатант собирали и упаривали с целью удаления диэтилового эфира, добавляли 1 мл этилацетата. Полученную пробу анализировали на газовом хроматографе.

## Результаты и обсуждение

Проверка биосовместимости исследуемых штаммов дрожжей, результаты которой представлены в таблице 1, проводилась в два этапа. На первом этапе выявлялась парная совместимость штаммов, на втором исследовалась совместимость при культивировании консорциумов, состоящих из трех штаммов дрожжевых клеток.

При парном культивировании семь из девяти штаммов показали высокий уровень биосовместимости: *K. marxianus* (Y-2039), *S. stipites* (Y-3264), *P. tannophilus* (Y-3269), *S. cerevisiae* M (Y-4242), *Z. rouxii* (Y-4659), *S. bacillaris* (Y-4015), *L. thermotolerans* (Y-4532). Штамм *S. ludwigii* 8 (Y-2012) проявил совместимость со штаммами *S. stipites* (Y-3264) и *S. cerevisiae* M (Y-4242). Штамм дрожжей *T. delbrueckii* (Y-1539) выявил совместимость только с *L. thermotolerans* (Y-4532). Вследствие низкой совместимости при сокультивировании *S. ludwigii* 8 (Y-2012) и *T. delbrueckii* (Y-1539) не были включены во второй этап тестирования на совместимость.



## Биосовместимость дрожжевых микроорганизмов

Тест	Штаммы (Y-)	4242	3269	4532	4015	4659	2012	1539	3264	2039
I	4242	К	б	б	б	б	с	А	б	б
	3269	б	К	б	б	б	А	А	б	б
	4532	б	б	К	б	б	А	с	б	б
	4015	б	б	б	К	б	А	А	б	б
	4659	б	б	б	б	К	А	А	б	б
	2012	б	А	А	А	А	К	А	с	А
	1539	А	А	с	А	А	А	К	А	А
	3264	б	б	б	б	б	с	А	К	б
II	2039	б	б	б	б	б	А	А	б	К
	4242	К	с							
	3269		К	с						
	4532			К	с					
	4015	с			К					
	4659		с			К				
	3264	б		с					К	
	2039		б		с					К

Примечание: К – контроль; А – антагонизм; с – слабый антагонизм; б – биосовместимость.

Подбор штаммов для тестирования в консорциумах проводился в случайном порядке, так как, согласно литературным данным, все исследуемые штаммы в равной степени способны к продуцированию этанола. Тестирование показало, что консорциумы с составом *Saccharomyces cerevisiae* M (Y-4242) / *Pachysolen tannophilus* (Y-3269) / *Scheffersomyces stipitis* (Y-3264) (консорциум I) и *Pachysolen tannophilus* (Y-3269) / *Lachancea thermotolerans* (Y-4532) / *Kluyveromyces marxianus* (Y-2039) (консорциум II) обладают наилучшей способностью к совместному культивированию. Эти консорциумы были использованы для сбраживания гидролизата мискантуса. В прочих консорциумах был показан слабый антагонизм какого-либо одного из штаммов.

Отобранные консорциумы были подвергнуты сбраживанию, при этом консорциумом I сбраживание осуществлялось в стационарных и нестационарных условиях, консорциумом II – только в нестационарных условиях. С использованием градуировочной зависимости была отслежена динамика содержания глюкозы в образцах по мере протекания процесса сбраживания (за исключением сбраживания с консорциумом I в стационарных условиях), а также рассчитана скорость сбраживания редуцирующего вещества (РВ) (рис., табл. 2).

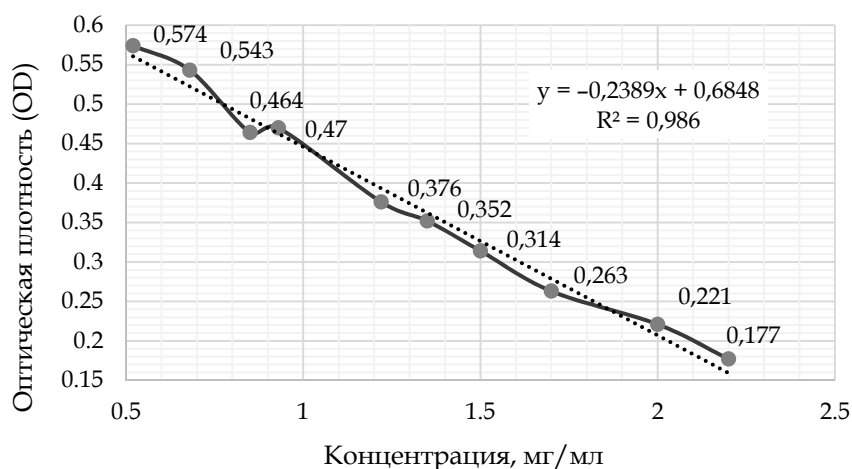


Рис. Градуировочная зависимость для определения РВ (D-глюкоза)

Таблица 2

## Динамика процесса сбраживания ферментативного гидролизата

№ пробы	Время, ч	Консорциум I			Консорциум II		
		РВ, мг/мл	Конверсия РВ, %	$K_{сб}$ , $10^3\text{ч}^{-1}$	РВ, мг/мл	Конверсия РВ, %	$K_{сб}$ , $10^3\text{ч}^{-1}$
0	0	19,62	—	—	9,72	—	—
1	24	18,80	4,18	1,78	8,90	8,44	3,67
2	48	16,17	17,58	4,02	6,09	37,35	9,74
3	72	15,68	20,08	3,11	3,83	60,60	12,92
4	96	13,54	30,99	3,86	3,87	60,19	9,58
5	120	7,10	63,81	8,47	3,75	61,42	7,93
6	144	6,77	65,49	7,38	3,67	62,24	6,76

Примечание:  $K_{сб}$  – константа скорости сбраживания.

Выход этанола для образцов рассчитывали с учетом исходной концентрации РВ:  $14,13 \pm 0,1$  г/л и  $19,64 \pm 0,1$  г/л для консорциума I в стационарных и нестационарных условиях соответственно и  $9,52 \pm 0,1$  г/л для консорциума II.

Максимальная скорость сбраживания наблюдалась на пятые сутки для консорциума I и на третьи сутки для консорциума II. Однако скорость сбраживания субстрата консорциумом II была более равномерной на всем протяжении процесса. Оптимальное время сбраживания находится в диапазоне 72–120 ч, после чего наблюдаются процессы ингибирования продуктами реакции. Результат спиртового сбраживания приведен в таблице 3.



## Результаты спиртового брожения

Показатель	Консорциум I		Консорциум II
	Стационарно	Нестационарно	
Исходное содержание РВ, мг/мл	14,13	19,62	9,72
Конверсия РВ, %	84,36	65,49	62,24
Содержание этанола в бражке, % об.	0,058	0,031	0,026
Выход этанола в результате сбраживания, %	7,58	3,72	6,72

Сравнивая полученные данные, можно заключить, что более эффективным в процессе спиртового брожения оказался консорциум I, состоящий из штаммов *Saccharomyces cerevisiae* M (Y-4242), *Pachysolen tannophilus* (Y-3269) и *Scheffersomyces stipitis* (Y-3264), при стационарных условиях сбраживания (84,36 % конвертированных РВ). Полученные данные в целом согласуются с литературными данными, согласно которым выход этанола можно увеличить путем совмещения в инокуляте дрожжей рода *Saccharomyces* и дрожжей, относящиеся к другим родам [3].

Более высокий уровень выхода этанола при сбраживании глюкозы с использованием консорциума I в стационарных условиях, по сравнению с результатами сбраживания в динамических условиях, может быть связан с тем, что *S. cerevisiae* и *S. stipites* являются факультативными анаэробами. Объем этанола в бражке, полученной с помощью консорциума II, также выше, что может объясняться оптимальной аэрацией *P. tannophilus* в сочетании с присутствием стрессоустойчивых продуцентов этанола *L. thermotolerans* и *K. marxianus*.

В дальнейшей работе планируется подобрать оптимальные условия сбраживания для обозначенных консорциумов для достижения более полной конверсии микроорганизмами РВ гидролизата и провести повторные испытания, которые позволят осуществить более полный статистический анализ.

## Выводы

Изучена биосовместимость ряда дрожжей, полученных из коллекции ВКПМ ГосНИИгенетика: *K. marxianus* (Y-2039), *S. stipites* (Y-3264), *P. tannophilus* (Y-3269), *S. cerevisiae* M (Y-4242), *S. ludwigii* 8 (Y-2012), *Z. rouxii* (Y-4659), *S. bacillaris* (Y-4015), *L. thermotolerans* (Y-4532), *T. delbrueckii* (Y-1539). Установлено, что штаммы *K. marxianus* (Y-2039), *S. stipites* (Y-3264), *P. tannophilus* (Y-3269), *S. cerevisiae* M (Y-4242), *Z. rouxii* (Y-4659), *S. bacillaris* (Y-4015), *L. thermotolerans* (Y-4532) обладают способностью к совместному культивированию.

Созданные дрожжевые консорциумы показали высокую бродильную активность. Итоговый выход биоэтанола составил для консорциума I (*Saccharomyces cerevisiae* M (Y-4242) / *Pachysolen tannophilus* (Y-3269) /





*Scheffersomyces stipitis* (Y-3264)) 7,58 % в стационарных и 3,72 % в нестационарных условиях, для консорциума II (*Pachysolen tannophilus*) (Y-3269) / *Lachancea thermotolerans* (Y-4532) / *Kluyveromyces marxianus* (Y-2039)) 6,72 % в нестационарных условиях.

Несмотря на то что при использовании консорциума I (в стационарных условиях) объем получаемого биоэтанола выше по сравнению с остальными образцами, скорость конверсии РВ консорциумом II достигает максимального значения раньше и в среднем выше, в связи с чем использование консорциума II представляется более перспективным.

### Список литературы

62

1. Садыков Р.Р., Хасанишин Р.Р., Илалова Г.Ф. и др. Жидкое топливо из растительной биомассы. Биоэтанол // Наука молодых – будущее России : сб. науч. ст. : в 6 т. Т. 6. Курск, 2018. С. 292–297.
2. Хабаров Ю.Г., Камакина Н.Д., Веиняков В.А. Фотометрический метод количественного определения редуцирующих сахаров в растворах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2008. № 5. С. 129–133.
3. Цед Е.А. Природные консорциумы микроорганизмов как потенциальные источники броидильных процессов // Вестник МГУП им. Ивана Федорова. 2012. № 2. С. 13.
4. Akaracharanya A., Krisomdee K., Tolieng V. et al. Improved SSF-cellulosic ethanol production by the cellobiose fermenting yeast *Kluyveromyces marxianus* G2-16-1 // Chiang Mai Journal of Science. 2016. Т. 43, № 5. P. 985–996.
5. Azhara S., Abdullaa R., Jamboa S. et al. Yeasts in sustainable bioethanol production: A review // Biochemistry and Biophysics Reports. 2017. Vol. 10. P. 52–61.
6. Benito Á., Calderón F., Benito S. The Influence of Non-Saccharomyces Species on Wine Fermentation Quality Parameters // Fermentation. 2019. Vol. 5, № 3.
7. Cuevas M., Saleh M., Garsia-Martin J., Sanchez S. Acid and Enzymatic Fractionation of Olive Stones for Ethanol Production Using *Pachysolen tannophilus* // Processes. 2020. Vol. 8, № 2.
8. Domènech G.R., Martínez G.L., Barrera E. et al. Enhancing the tolerance of the *Starmerella bacillaris* wine strain to dehydration stress // Annals of Microbiology. 2018. Vol. 68, № 10. P. 667–676.
9. Djelal H., Chniti S., Jemni M. et al. Identification of strain isolated from dates (*Phoenix dactylifera* L.) for enhancing very high gravity ethanol production // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24, № 11. P. 9886–9894.
10. El Harchi M., Kachkach F.Z.F., El Mtili N. Optimization of thermal acid hydrolysis for bioethanol production from *Ulva rigida* with yeast *Pachysolen tannophilus* // South African Journal of Botany. 2018. Vol. 115. P. 161–169.
11. Esteves M., Barbosa C., Vasconcelos I., Tavares M.J. et al. Characterizing the Potential of the Non-Conventional Yeast *Saccharomycodes ludwigii* UTAD17 in Wine-making // Microorganisms. 2019. Vol. 7, № 11.
12. Ferreira J., Santos V.A.Q., Cruz C.H.G. Ethanol production by co-culture of *Zymomonas mobilis* and *Pachysolen tannophilus* using banana peels hydrolysate as substrate // Acta Scientiarum. Technology. 2018. Vol. 40. P. e35169-e35169.
13. Golias H., Dumsday G.J., Stanley G.A., Pamment, N.B. Evaluation of a recombinant *Klebsiella oxytoca* strain for ethanol production from cellulose by simultaneous saccharification and fermentation: comparison with native cellobiose-utilising yeast strains and performance in co-culture with thermotolerant yeast and *Zymomonas mobilis* // Journal of biotechnology. 2002. Vol. 96, № 2. P. 155–168.



14. Karagöz P., Özkan M. Ethanol production from wheat straw by *Saccharomyces cerevisiae* and *Scheffersomyces stipitis* co-culture in batch and continuous system // *Bioresource technology*. 2014. Vol. 158. P. 286–293.

15. Nurcholis M., Lertwattanasakul N., Rodrussamee N. et al. Integration of comprehensive data and biotechnological tools for industrial applications of *Kluyveromyces marxianus* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020. Vol. 104, № 2. P. 475–488.

16. Silva E.G., da, Borges A.S., Maione N.R. et al. Fermentation of hemicellulose liquor from Brewer's spent grain using *Scheffersomyces stipitis* and *Pachysolen tanophilus* for production of 2G ethanol and xylitol // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2020. Vol. 14, № 2. P. 127–137.

#### Об авторах

Екатерина Александровна Буденкова – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: KBudenkova@gmail.com

Яков Андреевич Масютин – канд. хим. наук, доц., Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Россия.

E-mail: yma1989@mail.ru

#### The authors

Ekaterina A. Budenkova, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: KBudenkova@gmail.com

Dr Iakov A. Masiutin, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: yma1989@mail.ru